

# CONNESSIONI SISMICHE INNOVATIVE PER EDIFICI IN PREFABBRICATO

di/by Stefano Pampanin

# INNOVATIVE SEISMIC CONNECTIONS FOR PRECAST CONCRETE BUILDINGS

Dopo una prima panoramica generale sul problema sismico nell'ambito della prefabbricazione, pubblicato sul numero precedente di ELITE, in questo contributo si entra nel vivo del discorso, illustrando con maggior dettaglio gli aspetti tecnologici legati a soluzioni innovative adottate per la realizzazione di connessioni tra elementi strutturali sia per strutture a telaio sia per strutture a muro. A conclusione dell'argomento, nel prossimo numero, si cureranno gli aspetti progettuali sia a livello di connessione che di sistema sismico nel suo complesso.

## VALIDAZIONI SPERIMENTALI

Con l'intento di approfondire la conoscenza delle prestazioni sismiche di strutture in c.a. prefabbricato che non seguano la filosofia di "emulazione" del comportamento del c.a. gettato in opera e sviluppare normative di progettazione razionali, il programma di ricerca PRESS (PREcast Seismic Structural System), iniziato nei primi anni '90 e conclusosi di recente (Priestley, 1991, 1996, 1999), ha promosso un'estesa campagna di ricerca analitico-sperimentale per lo sviluppo di sistemi (e sottosistemi) sismici alternativi, basati sull'utilizzo di connessioni duttili asciutte senza necessità di getti integrativi di completamento (vedi numero precedente).

La fase conclusiva del programma ha visto, presso la University of California a San Diego, la progettazione, costruzione e prova sperimentale sotto carichi sismici simulati di un edificio di cinque piani in cemento armato prefabbricato in scala 60% (Nakaki et al. 1999; Priestley et al. 1999).

L'edificio-test [1-2] rappresentava un modello in scala 60% di un edificio prototipo di cinque piani adibito ad ufficio e caratterizzato da dimensioni in pianta di 30.5 m x 61 m, un'altezza interpiano di 3.81 m e lunghezza di ogni campata di 7.62 m. Le dimensioni del modello sono state limitate in pianta a 9.14 m x 9.14 m e due campate per parte. La resistenza alle sollecitazioni laterali indotte dal sisma è stata affidata, in una direzione, a due differenti telai in parallelo con quattro diverse tipologie di connessione trave-colonna e, nella direzione ortogonale, ad un muro a taglio e due telai a gravità [3]. Nel complesso dunque si sono potute studiare, con una unica

*In the previous issue of ELITE a preliminary overview on the seismic design of precast concrete structures has been given. In this contribution we enter the core of the topic, illustrating in more details the technological aspects of innovative solutions adopted to connect structural elements either for frame or shear wall systems. In the next issue, in conclusion, the design aspects of both connections and whole seismic system will be discussed.*

## EXPERIMENTAL VALIDATION

With the main scope of developing and investigating the seismic response of precast structures alternative to the "emulation" of cast-in-place approach, the U.S. PRESS (PREcast Seismic Structural System) research program was initiated at the beginning of the 90's and has been recently concluded (Priestley, 1991, 1996, 1999). Under this project, extensive analytical-experimental investigations to develop practical and efficient solutions for precast systems (and subassemblies) in seismic areas, based on ductile dry connections (see previous issue), have been carried out. The last phase of the program consisted of design, construction, and experimental test under simulated seismic loads of a five-storey precast concrete building, 60% scaled, at the University of California, San Diego (Nakaki et al., 1999, Priestley et al., 1999).

The Test-Building [1-2] represented a prototype of a precast office building, 30.5 m x 61 m in plan, with 3.81 m of storey height and 7.62 m of bay length. The size of testing laboratory limited the test building to 9.14 x 9.14 in plan and two-by-two bays.

The seismic resistance was provided, in one direction, by two different frames comprising four alternative solutions for beam-column connections and, in the transverse direction, by a shear wall system with two gravity frames [3].

In total five alternative seismic connection solutions for precast structural elements were therefore validated within the experimental test. Two different slab floor systems, typically adopted in construction practice, topped hollow core or pre-topped double tees, were used at different floors.

1  
Edificio-Test nel laboratorio della University of California, San Diego.

Test-Building in the laboratory of the University of California, San Diego.



2  
Edificio-Test: sistema a muro a pannelli in fase di costruzione

Test-Building: panel wall system under construction

3  
Sistemi antisismici nell'Edificio-Test: pianta dell'edificio al 4° piano

Seismic systems in the Test-Building: plan view at 4th floor

4  
Sistema a telaio

Frame system: elevation view

5  
Connessione ibrida trave-colonna

Hybrid beam-column connection



prova sperimentale, cinque differenti soluzioni per connessioni tra elementi strutturali in prefabbricato. Due differenti sistemi a solaio, tipicamente utilizzati nella pratica costruttiva, a pannelli alveolari estrusi (hollow-core) o a travi prefabbricate a doppio T sono stati utilizzati a piani distinti.

I risultati della prova sperimentale hanno fornito, come già anticipato nel precedente numero, una eccellente conferma sulla prestazione sismica delle connessioni adottate, sia per sistemi a telaio che per sistemi a muro utilizzabili per diverse tipologie di strutture in prefabbricato: uffici, edifici di civile abitazione, strutture a parcheggio, capannoni industriali mono- o multi-piano.

E' opportuno ricordare che il test di un edificio a larga scala, costituito da differenti sistemi sismici, mirava in primo luogo a validare il comportamento di insieme di una strutturale reale complessa (comprensiva di sistemi sismici, telai a gravità, pannelli di muro e sistemi a solaio) e, al tempo stesso, verificare problemi in fase di realizzazione e velocità di montaggio. Nei limiti di spazio e operabilità del laboratorio dell'Università di San Diego, la costruzione dell'edificio è stata completata in 12 giorni lavorativi.

## SOLUZIONI PER SISTEMI A TELAIO

Tra le diverse soluzioni adottate per la connessione trave-colonna in un sistema a telaio [4], particolare rilievo si vuole dare in questo contributo alla soluzione di tipo ibrido, in grado di garantire una estrema flessibilità

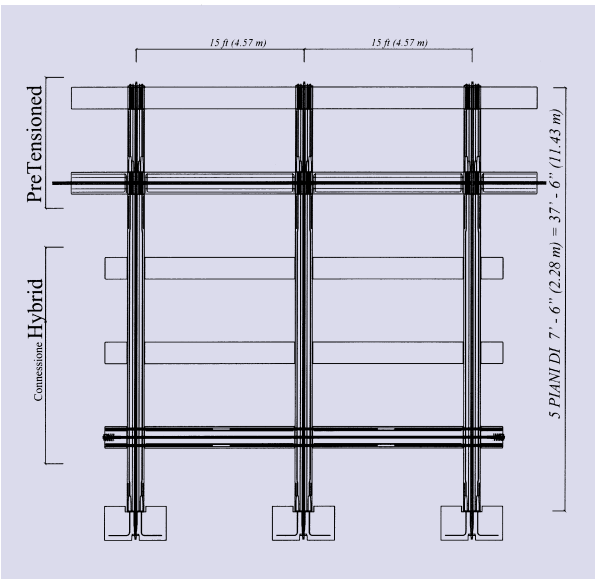
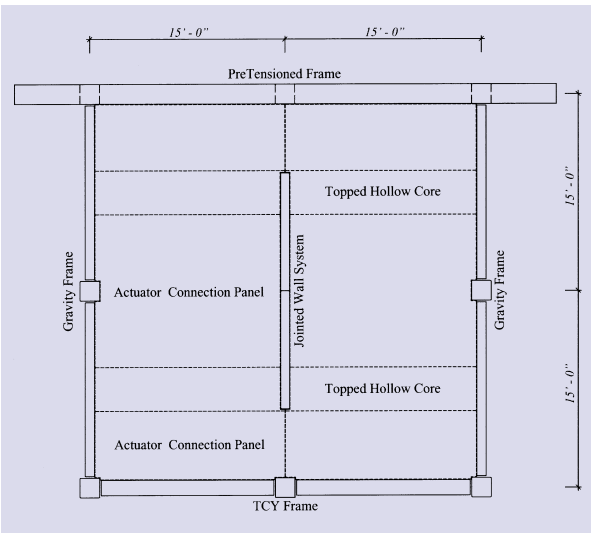
in fase di progettazione con possibilità di ottimizzare le prestazioni del sistema durante la risposta sismica.

### Connessione di tipo ibrido

Caratterizzata dalla contemporanea presenza di cavi non aderenti post-tesi e armatura ordinaria, tale connessione [5-6] è stata studiata per ridurre il livello di danneggiamento negli elementi in prefabbricato garantendo l'apertura e la chiusura di una fessura all'interfaccia trave-colonna ed un' adeguata dissipazione energetica tramite lo snervamento dell'armatura ordinaria (Stanton et al., 1997).

I cavi di post-tensione sono inseriti in guaine, senza iniezione di malta per un tratto di lunghezza opportunamente progettata, per mantenere le deformazioni in campo elastico. Si evitano dunque perdite di carico di post-tensione che garantisce la resistenza a taglio sismico per semplice attrito alla sezione di interfaccia, dove è disposto uno strato-cuscinetto di malta fibrorinforzata. L'armatura lenta è inserita in guaine metalliche corrugate e successivamente riempite con malta per garantire aderenza con il calcestruzzo, salvo per brevi tratti in prossimità dell'interfaccia con la colonna per ridurre le deformazioni localizzate nell'acciaio ed evitare premature rotture delle barre.

Vengono dunque a combinarsi, in un'unica soluzione di tipo ibrido, i vantaggi di un comportamento di tipo non-lineare elastico (riduzione delle deformazioni residue con chiusura delle fessure) con quelli tipici di un soluzione monolitico in c.a. gettato in opera (alta dissipazione energetica) [7].



As already mentioned in the previous issue, the results of the experimental tests provided important confirmation on the excellent seismic performance of the adopted solutions, for both frame and wall systems, which can be adopted for different precast building typologies: offices, civil buildings, parking structures, one- or multi-storey industrial plans.

It is worth recalling that the test on a large scale precast concrete building, comprising different seismic-resisting solutions, intended to provide a fundamental validation of the global response of a real complex structure (including seismic systems, gravity frames, wall panels and floor slabs) and, at the same time, to investigate issues related to construction and erection velocity. Within the limits of space and operability of the laboratory of the University of San Diego, the erection of the buildings was completed in 12 working-days.

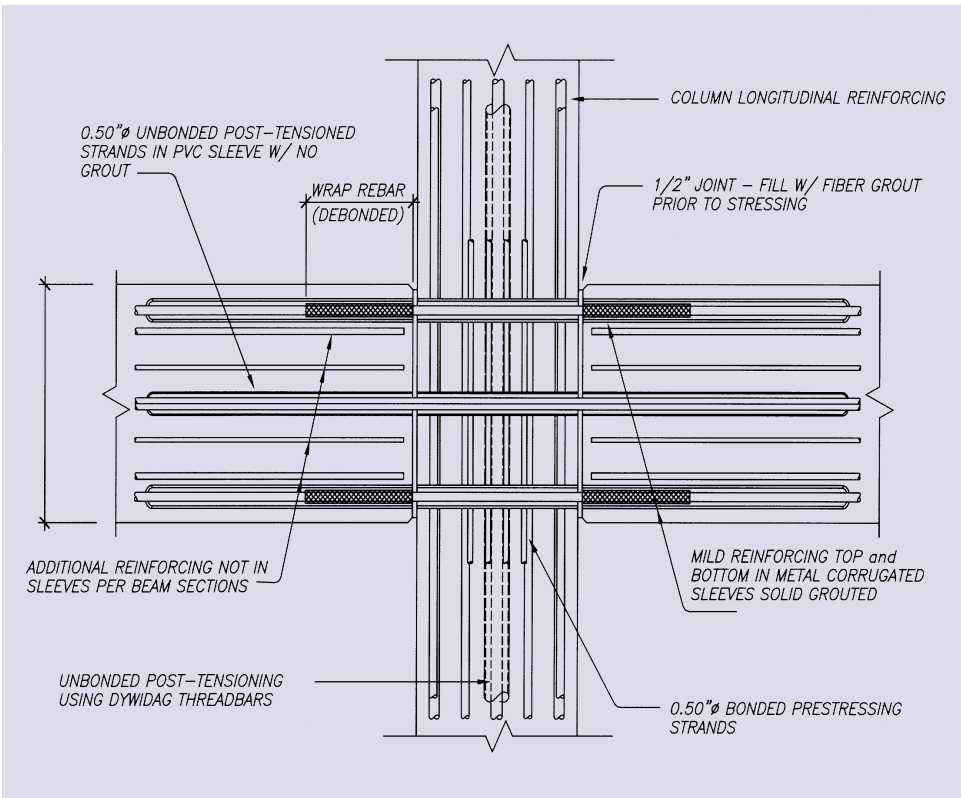
### SOLUTIONS FOR FRAME SYSTEMS

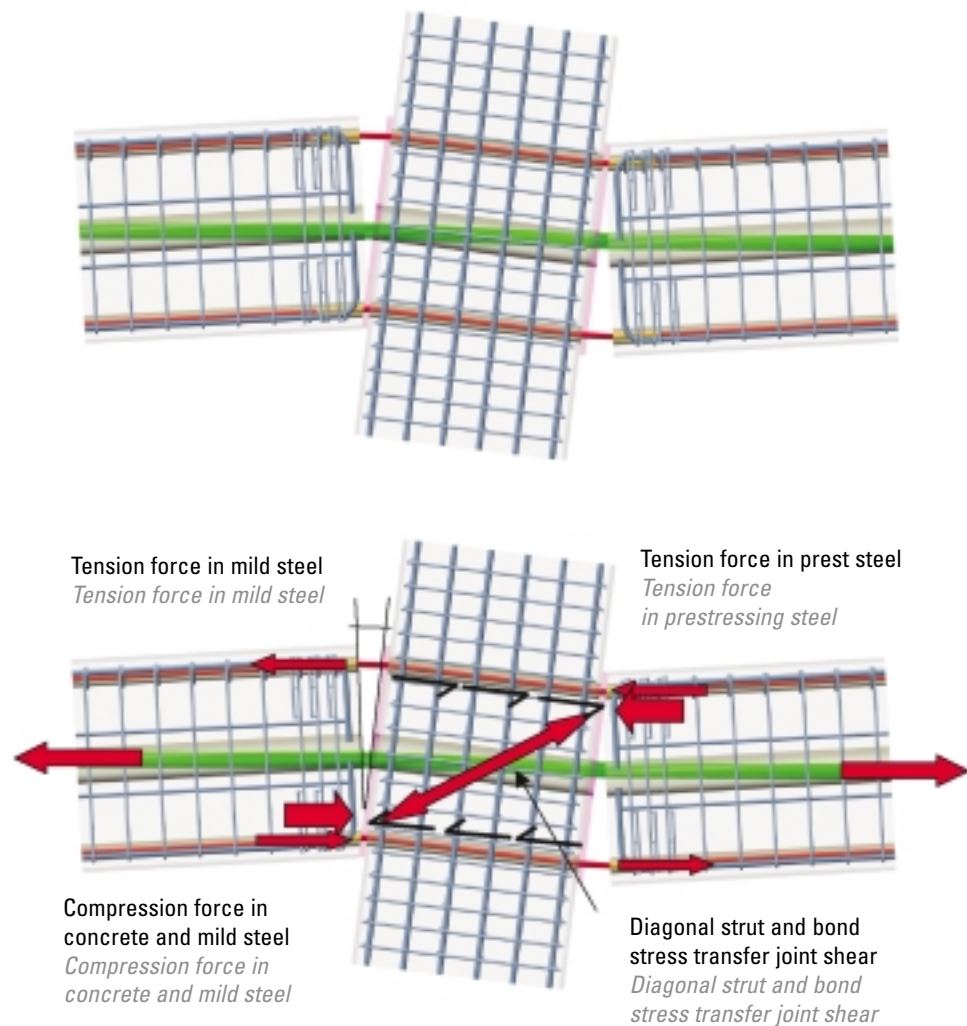
Within the different beam-column connections proposed for a frame system [4], a particular attention will be herein given to the hybrid solution, which can guarantee a significant design flexibility with possible optimization of the structural performance during the seismic response.

#### Hybrid connection

Through a combination of unbonded post-tensioned tendons and mild steel longitudinal reinforcement, the hybrid solution [5-6] has been conceived to significantly

reduce the level of damage in precast elements allowing opening and closing of a neat pre-existing gap at the beam-column interface and a sufficient energy dissipation from the yielding of mild steel (Stanton et al., 1997). The post-tensioned tendons/bar are placed in ducts, maintained ungrouted for an adequately designed unbonded length in order to limit the deformations within the elastic range. Losses of post-tensioned force are therefore avoided, which guarantees the seismic shear resistance by friction at the beam-column interface where a fiber-reinforced gout pad is placed. The mild steel longitudinal reinforcement is placed in corrugated metallic sleeves, grouted to guarantee bond conditions between concrete and steel, except of a limited and short length at the critical interface to reduce localized deformations and avoid premature failure of the steel bars. The advantages of a non-linear elastic behavior (reduction of the residual deformations and closure of existing cracks) are combined, in a unique hybrid solution, with those typical of a monolithic cast-in-place reinforced concrete system (energy dissipation) [7].





## ELEVATE PRESTAZIONI SISMICHE

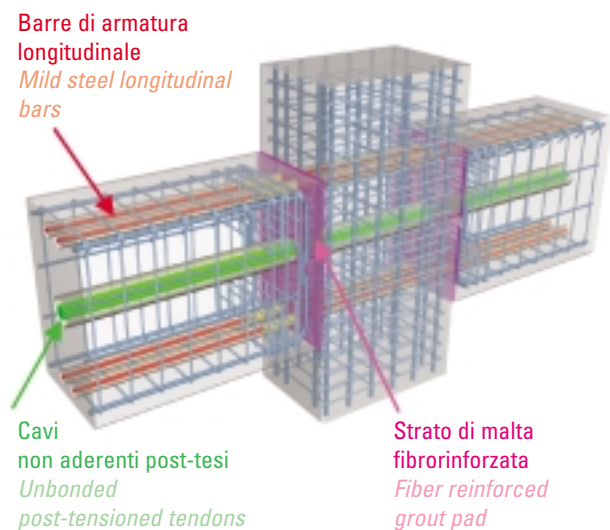
### Sistema a telaio

Come atteso e confermato dalle prove sperimentali (Priestley et al., 1999), le peculiari caratteristiche di tali connessioni asciutte a dissipazione concentrata, comportano una concentrazione della domanda inelastica (i.e. rotazione relativa trave-colonna) nelle sezioni critiche di interfaccia (trave-colonna o pannello di base-fondazione) con l'apertura e chiusura di un'unica preesistente fessura. A differenza dunque di quanto risulterebbe da una connessione di tipo monolitico (c.a. gettato in opera), il livello di fessurazione e danneggiamento negli elementi strutturali prefabbricati al di fuori delle sezioni critiche e nei nodi trave-colonna è ridotto a livelli trascurabili [11], con immediato impatto sui costi di riparazione e manutenzione della struttura, nonché sui costi indiretti dovuti ad una prolungata inagibilità della struttura stessa a seguito dell'evento sismico.

La presenza di cavi non aderenti post-tesi (sistema muro e connessione ibrida trave-colonna), consente di ridurre in modo significativo le deformazioni/spostamenti residui (i.e. ampiezza delle fessure, spostamento interpiano), parametro estremamente importante nella risposta sismica di una struttura e spesso trascurato.

### Sistema a Muro

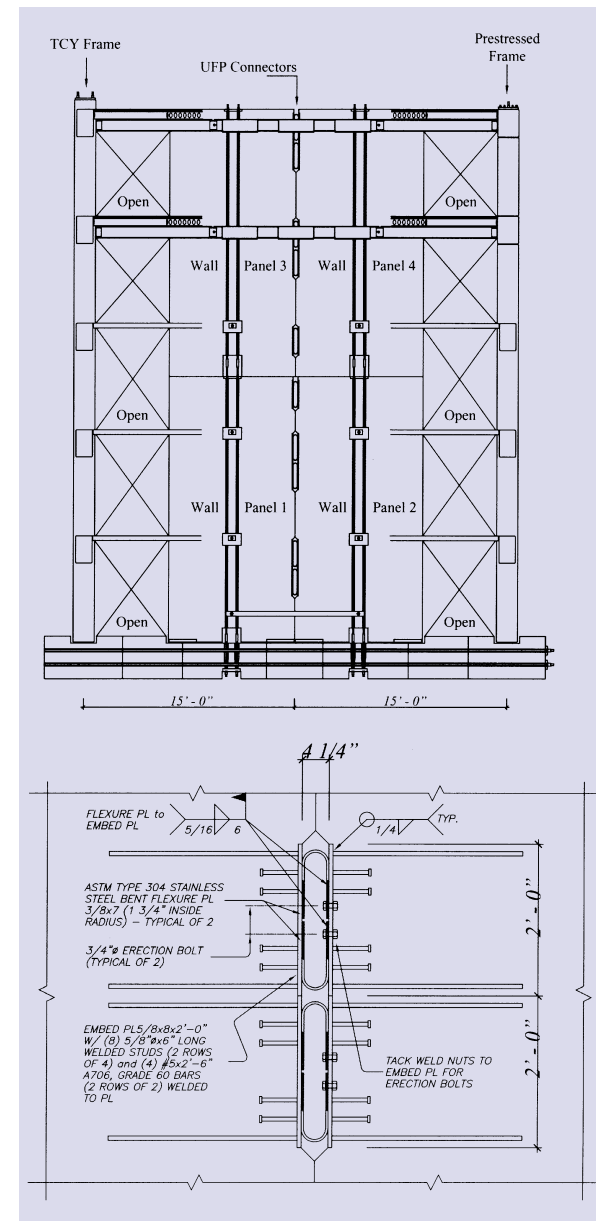
Come evidenziato sperimentalmente, il comportamento strutturale dei sistemi a muro soggetto ad azioni sismiche è in grado di salvaguardare gli elementi a pannello prefabbricati, nel quale non si è rilevata alcuna fessura. Il



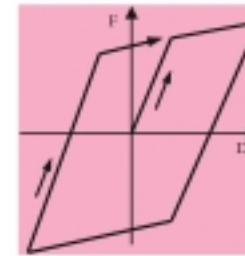
## SOLUTIONS FOR WALL SYSTEMS

The seismic-resistance system based on shear wall [8] can comprise adjacent precast wall panels, connected to the foundation by vertical unbonded post-tensioned tendons and designed to accommodate a rocking motion on the foundation base (the resistant overturning moment being given by the contribution of the self-weight and the elastic clamping force from the post-tensioned bars).

A significant energy dissipation capacity is provided by special steel devices (UFP, U-shape Flexural Plates), located in vertical joints, which take advantage of the relative displacements of adjacent panels [9-10].

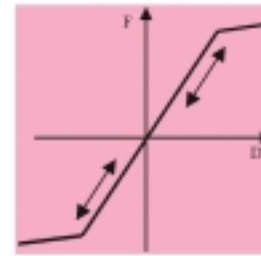


### Dissipazione Energy dissipation



Snervamento acciaio  
armatura lenta  
Mild steel yielding

### Auto-centramento Self-centering



Cavi post-tesi  
non aderenti  
Unbonded post-tensioned  
tendons



Self-centering capacity is also guaranteed by the unbonded post-tensioned tendons. The existing gap at the interface is closed as well as any other cracks developed during the seismic response. In shorts, the behavior is conceptually analogous to the hybrid system described for frame systems.

## HIGH SEISMIC PERFORMANCE

### Frame system

As expected and confirmed by the experimental tests (Priestley et al., 1999), the peculiar characteristics of these dry ductile connections imply a concentration of the inelastic demand (i.e. beam-column relative rotation) at the critical interface sections (beam-column or base panel-foundation) with opening and closing of a unique pre-existing gap. As opposite to the behavior of a monolithic solution, the cracking and damage in the pre-cast structural elements and in the joint panel regions is reduced to negligible levels [11]. The positive effects on the repairing and maintenance costs as well as on the indirect costs related to the interruption of building functionality for a medium-long period after the seismic events are evident.

7  
Concetto di sistema ibrido.

Hybrid system concept.

8  
Sistema a muro  
con connettori UFP.

Wall system with UFP  
devices.

6  
Connessione ibrida  
trave-colonna:  
meccanismo  
di trasferimento forze.

Hybrid beam-column  
connection: force transfer  
mechanism  
(courtesy of Mrs. Suzanne  
Dow Nakaki1)

1The Nakaki Bashaw  
Group, Inc.  
17101 Armstrong Ave.,  
Suite 208  
Irvine, California 92614

## SOLUZIONI PER SISTEMI A MURO

Il sistema sismico con muro a taglio [8] può essere costituito da pannelli in prefabbricato adiacenti connessi alla fondazione da barre non aderenti di post-tensione e progettati per potersi distaccare dalla fondazione (con momento resistente dato dalla somma del peso proprio e della forza di richiamo elastico delle barre post-tese) e oscillare come corpo rigido (rocking).

Un'elevata dissipazione energetica è fornita al sistema da speciali connettori in acciaio (UFP, U-shape Flexural Plates) disposti nei giunti verticali che sfruttano lo scorrimento relativo di pannelli adiacenti [9-10]. Proprietà autocentranti, con chiusura delle fessure e ripristino della configurazione pre-evento sismico, sono inoltre garantite dalla presenza delle barre verticali post-tese non aderenti. In sostanza, si configura un sistema di tipo ibrido concettualmente analogo alla soluzione descritta per la connessione trave-colonna di sistemi a telaio.

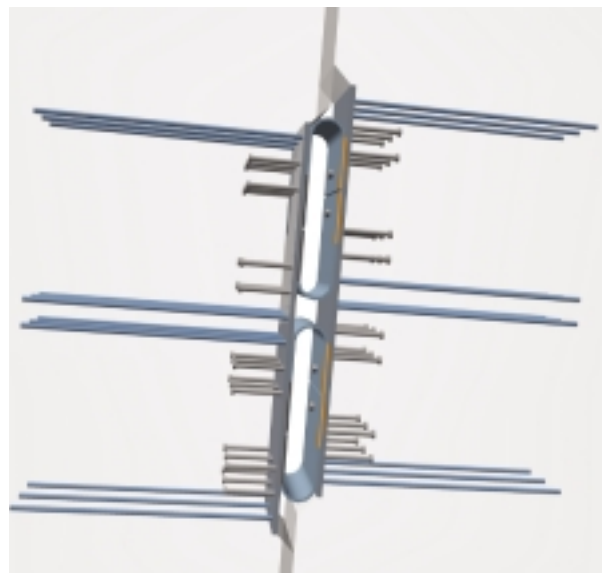
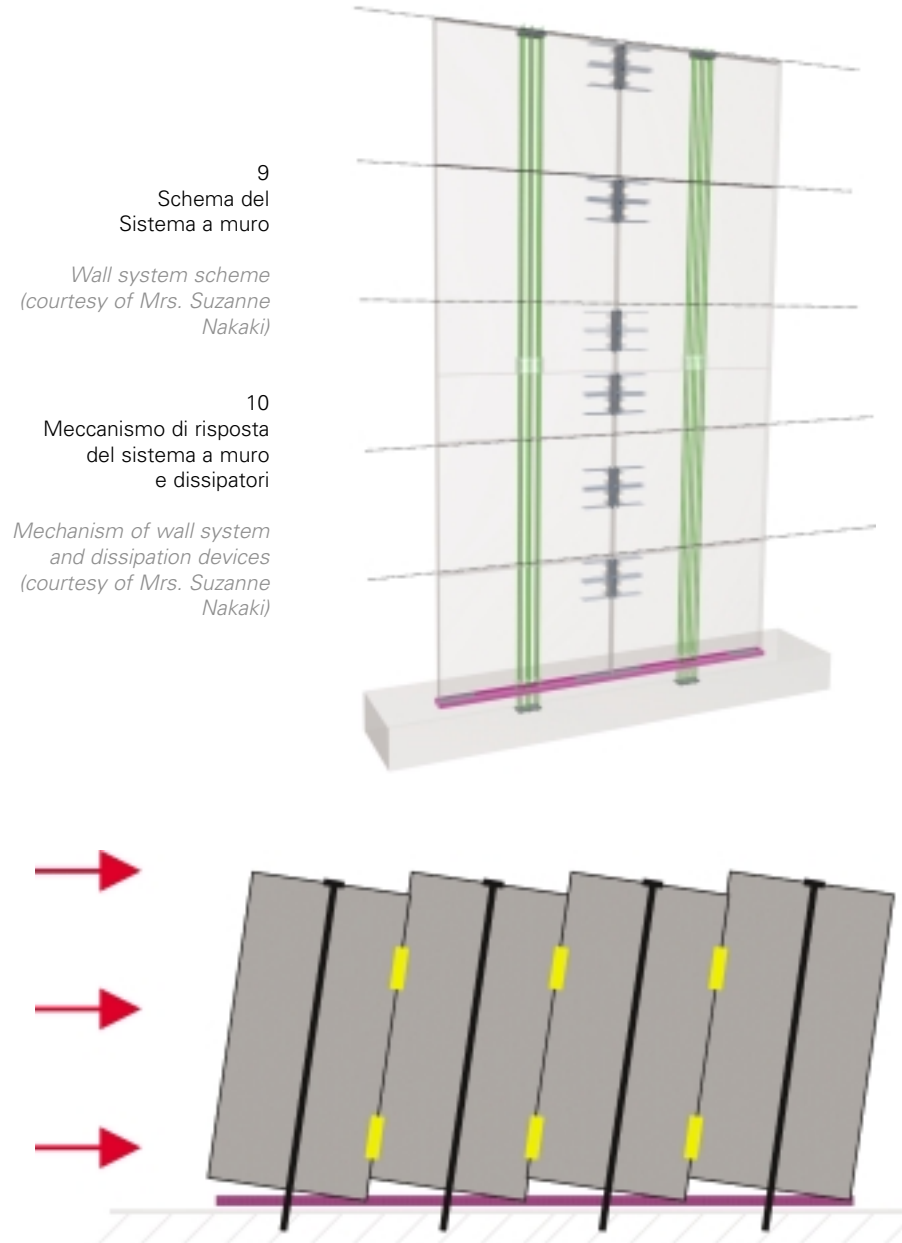


9  
Schema del  
Sistema a muro

Wall system scheme  
(courtesy of Mrs. Suzanne  
Nakaki)

10  
Meccanismo di risposta  
del sistema a muro  
e dissipatori

Mechanism of wall system  
and dissipation devices  
(courtesy of Mrs. Suzanne  
Nakaki)



moto oscillante (rocking) dei pannelli rispetto alla fondazione di base comporta infatti l'apertura e chiusura di una fessura pre-esistente nella regione critica alla base (connessione con la fondazione) dove si può riscontrare un lieve danneggiamento nel calcestruzzo, facilmente riparabile, alle estremità [12]. Gli speciali dissipatori UFP, oltre a fornire una resistenza flessionale aggiuntiva all'intero sistema, tramite accoppiamento dei pannelli, possono garantire un'elevata dissipazione energetica, senza alcun danneggiamento evidente [12].

## METODO PROGETTUALE ADEGUATO

L'eccellente performance delle soluzioni descritte per connessioni di elementi strutturali in prefabbricato si traduce, dunque, in una sostanziale riduzione del livello di danneggiamento, con immediati vantaggi in termini sui costi di riparazione e manutenzione. I notevoli costi legati ad una prolungata interruzione di funzionalità della struttura in prefabbricato possono inoltre essere sostanzialmente ridotti se non completamente eliminati. E' il caso di ricordare però che, come ogni soluzione tecnologico-progettuale, il sistema ibrido, concepito come adeguata combinazione di barre di post-tensione in combinazione con armatura lenta o speciali dissipatori (nel caso di sistema a telaio o a muro, rispettivamente) e realizzata nella pratica con le caratteristiche tecnologiche mostrate, fonda la sua efficienza su una appropriata progettazione sismica d'insieme e di dettaglio, in grado di controllarne ed enfatizzarne i vantaggi. Tali aspetti saranno curati nel prossimo contributo.

## REFERENCES/REFERENCES

Nakaki, S.D., Stanton, J.F., and Sritharan, S., (1999), "An Overview of the PRESS Five-Story Precast Test Building", PCI Journal, Vol.44, No.2, pp.26-39.  
Priestley, M.J.N., (1991), "Overview of the PRESS Research Program", PCI Journal, Vol.36, No. 4, pp.50-57  
Priestley, M.J.N., (1996), "The PRESS Program –Current Status and Proposed Plans for Phase III", PCI Journal, Vol 41, No.2, pp.22-40.  
Priestley, M.J.N., Sritharan, S., Conley, J.R. and Pampanin, S., (1999), "Preliminary Results and Conclusions From the PRESS Five-Story Precast Concrete test Building", PCI Journal, Vol.44, No.6, pp.42-67  
Stanton, J.F., Stone, W.C., and Cheok, G.S., (1997), "A Hybrid Reinforced Precast Frame for Seismic Regions", PCI Journal, Vol. 42, No.2, pp.20-32

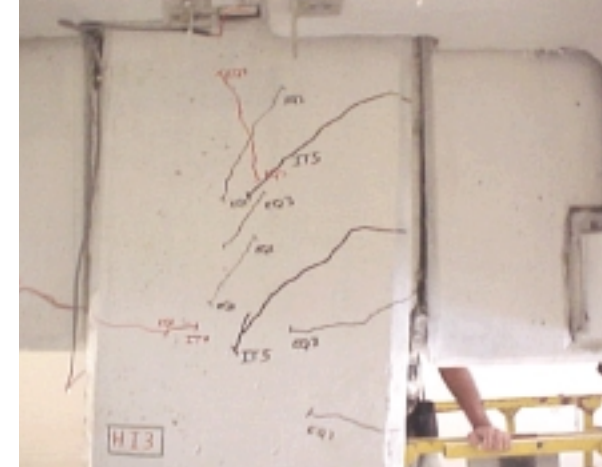
*The presence of unbonded post-tensioned tendons/bars (wall system and hybrid beam-column connection) can significantly reduce the residual deformations/displacements (i.e. cracks widths, interstorey relative displacement), which is a fundamental parameter, generally neglected, when evaluating the seismic performance.*

## Wall system

*As shown by the experimental tests, the seismic behavior of the proposed wall system can protect the precast panels from damage. No crack was in fact observed. In the rocking motion of the wall system on the base foundation, a unique existing gap is opened and closed at the critical base section and only light damage, easily repairable, is observed in the concrete at the panel edges [12]. The special UFP dissipation devices can provide an additional flexural strength to the whole system by coupling adjacent panels as well as an high energy dissipation capacity, without noticeable damage [12].*

## ADEQUATE SEISMIC DESIGN APPROACH

*The excellent performance of the described solutions for precast connections implies a significant reduction of the damage level, with immediate advantages in terms of reduction of repairing and maintenance costs. The high costs related to the interruption of building functionality and operability for long periods can furthermore be substantially reduced if not completely eliminated. However, it is worth recalling that the hybrid solution, conceived as appropriate combination of post-tensioned steel and mild steel longitudinal bars or special energy dissipation devices (frame system or wall system, respectively) and developed with the aforementioned technological aspects, bases its efficiency on an accurate and appropriate seismic design approach of structural details and whole system behavior, which can highlight and emphasize its intrinsic advantages. These design aspects will be discussed in the following contribution.*



11  
Comportamento  
sperimentale  
della connessione ibrida  
trave-colonna.

Experimental behavior  
of hybrid beam-column  
connection.



12  
Comportamento  
sperimentale  
del sistema a muro:  
a) oscillazione alla base  
b) connettori / dissipatori UFP.

Experimental behavior  
of wall system:  
a) rocking at base  
b) UFP connectors/  
dissipation devices

